第 38 卷第 11 期 2018 年 6 月 | 生 态 学 报 ACTA ECOLOGICA SINICA | Vol.38,No.11 Jun.,2018

DOI: 10.5846/stxb201708221518
潘萍,赵芳,欧阳勋志,臧颢,宁金魁,国瑞.马尾松林两种林下植被土壤碳氮特征及其与凋落物质量的关系.生态学报,2018,38(11):3988-3997.
Pan P,Zhao F,Ouyang X Z,Zang H,Ning J K,Guo R.Characteristics of soil carbon and nitrogen and relationship with litter quality under different understory vegetation in *Pinus massoniana* plantations.Acta Ecologica Sinica,2018,38(11):3988-3997.

马尾松林两种林下植被土壤碳氮特征及其与凋落物质量的关系

潘 萍[1],赵 芳[2],欧阳勋志[1,*],臧 颢[1],宁金魁[1],国 瑞[1]
1 江西农业大学林学院,南昌 330045
2 九江学院旅游与国土资源学院,九江 332005

摘要:以飞播马尾松林为研究对象,通过典型样地调查和样品测定,采用配对样本 t 检验和冗余分析(RDA)方法分析芒萁类和禾草类两种林下植被类型土壤碳、氮特征及其与凋落物质量之间的关系。结果表明:(1)土壤有机碳、微生物量碳、可溶性有机碳、全氮、速效氮、微生物量氮和可溶性有机氮含量在 0—10、10—20 cm 土层均表现为禾草类显著高于芒萁类($P<0.05$),而在 20—40、40—80 cm 土层两种植被类型碳氮指标的大小未表现出相同的变化规律,且差异不显著($P>0.05$)。(2)两种植被类型凋落物半分解和未分解层的 C 含量及 C/N 值均表现为芒萁类显著高于禾草类($P<0.05$),而 N 含量则表现为禾草类显著高于芒萁类($P<0.05$);同一植被类型的未分解层 C 含量及 C/N 值均显著大于半分解层,N 含量则半分解层显著大于未分解层($P<0.05$)。(3)0—10 cm 土层两种类型凋落物 C/N 值和 C 含量均与土壤碳氮各指标呈显著负相关($P<0.05$),N 含量与土壤碳氮各指标的相关性不显著($P>0.05$);10—20 cm 土层,芒萁类的半分解层 C/N 值与土壤碳氮各指标存在显著相关性($P<0.05$),禾草类的凋落物 C 含量与土壤碳氮各指标也存在显著相关性($P<0.01$)。林下植被凋落物 C/N 值越小,其分解速率越快,有利于土壤养分的积累,禾草类凋落物 C/N 值低于芒萁类是导致其土壤碳氮指标高于芒萁类的重要原因。

关键词:马尾松;飞播林;林下植被;土壤碳氮;凋落物质量

Characteristics of soil carbon and nitrogen and relationship with litter quality under different understory vegetation in *Pinus massoniana* plantations

PAN Ping[1],ZHAO Fang[2],OUYANG Xunzhi[1,*],ZANG Hao[1],NING Jinkui[1],GUO Rui[1]
1 *College of Forestry,Jiangxi Agricultural University,Nanchang* 330045,*China*
2 *College of Tourism and Territorial Resources,Jiujiang University,Jiujiang* 332005,*China*

Abstract: This study investigated aerially seeded *Pinus massoniana* plantations to analyze soil carbon and nitrogen distribution characteristics and the relationship with litter quality under two understory vegetation types (*Dicranopteris* and Graminoid) by using matched-pair t test and redundancy analysis. The results showed that: (1) At soil depths of 0—10 and 10—20 cm, soil organic carbon, microbial biomass carbon, dissolved organic carbon, total nitrogen, available nitrogen, microbial biomass nitrogen, and dissolved organic nitrogen were significantly higher for graminoid than for *Dicranopteris* ($P < 0.05$). However, at depths of 10—20 cm and 20—40 cm, the regularities of two understory vegetation types soil carbon and nitrogen indicators were different, but not significantly ($P > 0.05$). (2) The C content and C/N ratio of the semi-decomposed and undecomposed litter layer were significantly higher for *Dicranopteris* than for graminoid ($P < 0.05$). The N content of semi-decomposed and undecomposed litter layer of *Dicranopteris* were significantly higher than for

基金项目:国家自然科学基金项目(31360181,31160159)
收稿日期:2017-08-22; **修订日期**:2018-01-02

*通讯作者 Corresponding author.E-mail: oyxz_2003@hotmail.com

graminoid ($P < 0.05$). The C content and C/N ratio of the undecomposed litter layer were significantly higher than of the semi-decomposed litter layer, and the N content of the semi-decomposed litter layer was significantly higher than of the undecomposed litter layer ($P < 0.05$). (3) At 0—10 cm, the C/N ratio and C content of litter were significantly negatively correlated with soil carbon and nitrogen ($P < 0.05$), and the N content was not significantly correlated with soil carbon and nitrogen ($P > 0.05$). At 10—20 cm, the semi-decomposed litter C/N ratio of *Dicranopteris* was significantly correlated with soil carbon and nitrogen ($P < 0.05$). The litter C content of graminoid was significantly correlated with soil carbon and nitrogen ($P < 0.01$). The lower litter C/N ratio of understory vegetation was associated with a faster litter decomposition rate, which was helpful for accumulating soil nutrients. The litter C/N ratio of graminoid was lower than that of *Dicranopteris*, explaining why the soil carbon and nitrogen indicators were significantly higher for graminoid than for *Dicranopteris*.

Key Words: *Pinus massoniana*; aerially seeded plantations; understory vegetation; soil carbon and nitrogen; litter quality

土壤碳、氮含量及其动态平衡直接影响着土壤肥力和林地生产力[1-2],土壤微生物量碳氮是土壤有机碳氮中较为活跃的组分,在土壤营养物质转化和碳氮循环过程中发挥着重要作用,是土壤碳库动态变化的重要指标[3],而土壤可溶性碳氮作为有机质中的易变组分对土地利用方式、森林经营方式和生境干扰的响应更为敏感,可作为反映土壤质量变化的重要指标[4]。研究表明,林下植被和凋落物对土壤碳氮养分有重要影响[5-6]。林下植被是森林生态系统的重要组分,在维护生物多样性、生态系统稳定性和持续的立地生产力等方面起着重要作用[7],它主要通过其根系分泌物和凋落物来影响土壤碳氮养分循环;凋落物作为植被与土壤进行物质和能量交换的重要纽带,是土壤碳库输入的重要来源之一,对维持森林土壤肥力、生态系统物质循环及养分平衡等有着重要作用[8],它主要通过微生物分解将植物养分重新释放到土壤中,从而影响土壤碳氮养分循环。目前关于林下植被、凋落物对土壤碳氮影响的研究主要集中在林下植被去除[9]与改变凋落物数量及组成[10]等方面,关于不同林下植被类型凋落物对土壤碳氮影响却鲜有报道。马尾松林这方面的研究也多集中在对其林下植被特征[11]、生物量[12]、多样性[13]、盖度与环境因子和土壤质量的关系[14-15],以及凋落物特征[16]和土壤有机碳的影响因子[17]等方面;而在林下植被凋落物与土壤关系方面的研究较少,肖欣等[18]对人工马尾松林土壤有机碳与凋落物质量间的关系进行了研究,葛晓改[19]探讨了马尾松林凋落物分解对土壤碳库的影响等,但针对马尾松林不同林下植被类型的凋落物质量与土壤碳氮等关系的研究目前尚未见报道,而这方面的研究可为进一步了解林下植被-凋落物-土壤之间的相互作用机理提供参考。

赣南(江西省赣州市)曾是我国水土流失严重地区之一,尤其是该区的兴国县,水土流失现象范围广、强度大,曾被称为“江南沙漠”。该区域从 20 世纪 70 年代开始就陆续开展了大面积的以治理水土流失为目的马尾松(*Pinus massoniana*)飞播造林活动,以恢复森林植被,并取得了较显著成效。在林下植被恢复过程中,主要形成了芒萁类、禾草类两种类型,而这两种类型的土壤碳氮含量及凋落物质量有何差异目前尚不清楚。因此,本文以赣南马尾松飞播种子造林具有代表性的兴国县为研究区,分析这两种林下植被类型的土壤碳氮分布特征及其与凋落物质量的关系,为进一步揭示红壤退化区林下植被对土壤碳氮的影响机理提供科学依据;同时,为飞播马尾松林的科学经营和生态恢复提供参考。

1　研究区概况

兴国县地处我国中亚热带南部,江西省中南部,赣州市北部。地理坐标为 115°01′—115°51′E,26°03′—26°42′N。母岩主要为花岗岩、第四纪红色粘土、砂页岩、千枚岩等。土壤类型主要为红壤。该区为中亚热带温暖湿润气候,年平均气温为 18.9℃,年积温 6029.9℃;年均降雨量为 1539 mm,雨量多集中在 4—6 月;无霜期 280—300 d。森林资源丰富,主要植被类型有常绿阔叶林、马尾松林、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林等。据兴国县林业局相关统计资料,在 20 世纪 70—90 年代马尾松飞播造林多达 20 次,飞播林主要集中在花岗岩

分布区原植被破坏程度大、水土流失严重的丘陵区乡(镇),目前保存的飞播林主要为21—30年的中龄林。

2 研究方法

2.1 样地设置

对研究区飞播马尾松林主要分布区域进行踏查发现,其林下植被比较单一,并且阴坡及下坡位主要是芒萁类,阳坡主要有芒萁类和禾草类植物,上坡位往往林下植被稀少;芒萁类植物以铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)为唯一的优势种,灌木发育极少,而禾草类植物的优势种有雀稗(*Paspalum thunbergii*)、野古草(*Arundinella hirta*)、冰草(*Agropyron cristatum*),及少量的檵木(*Loropetalum chinense*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)等灌木。因此,本研究在同一地段人为干扰程度低的飞播马尾松纯林中按芒萁类、禾草类两种林下植被类型采用一对一设置配对典型样地(图1),每对典型样地水平距离不超过300 m。典型样地的林分年龄控制在Ⅲ龄级,即21—30年,土壤均为花岗岩发育的红壤,坡向为阳坡,坡位为中坡,林下植被盖度为60%—80%。样地大小为400 m^2(20 m×20 m),配对样地设置9次重复,共18个样地,所有样地的调查以及土壤、凋落物取样均在2012年8月完成。样地基本概况见表1。

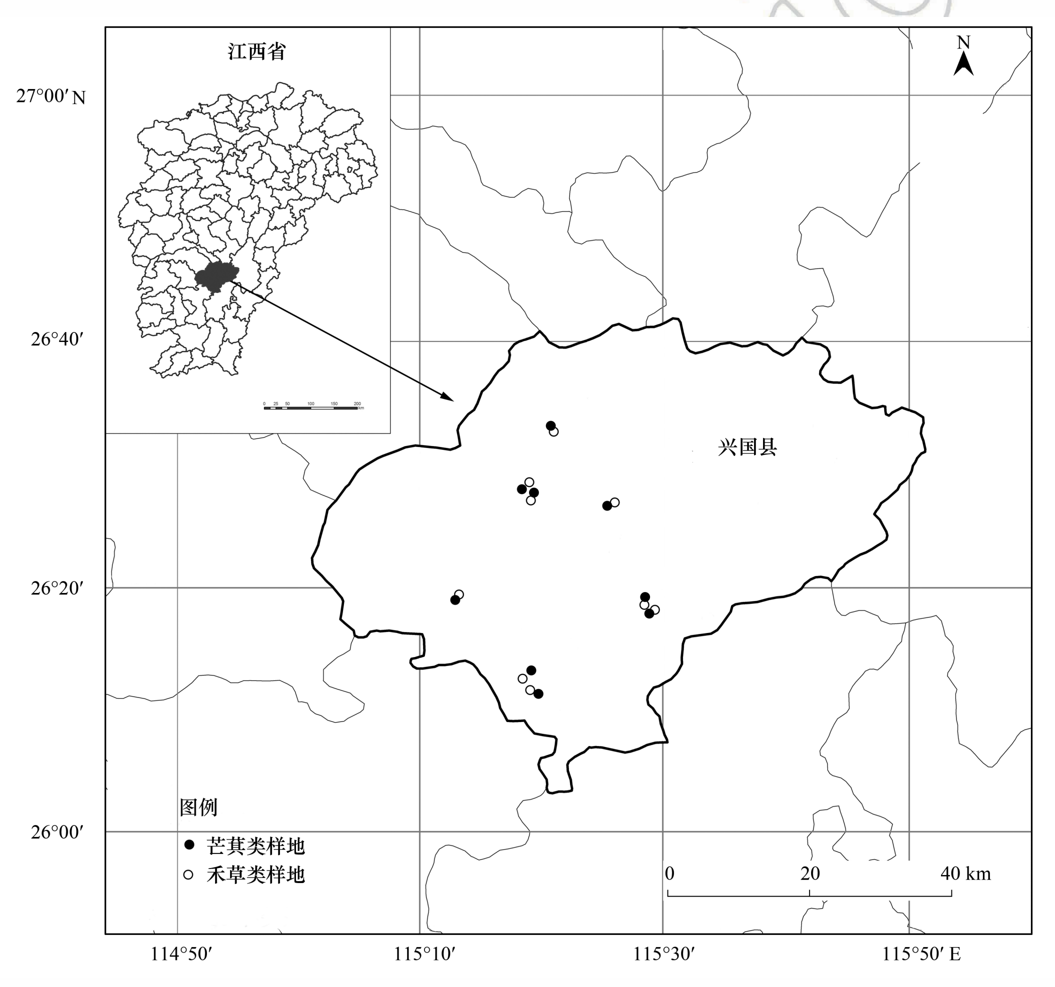


图1 样地分布示意图

Fig.1 Map of the sample plots distribution

2.2 土壤取样及指标测定

土壤样品采用土钻分别在样地的上、中、下方各取3个样点(每个样点3次重复)按0—10、10—20、20—40、40—80 cm分层采集,将样点土样混合均匀,取混合土样1 kg左右将其分成2份,一份4℃低温保鲜供测定土壤微生物量碳氮、速效氮及可溶性有机碳氮,另一份带回实验室自然风干后做土壤有机碳、全氮的测定。土

壤指标测定方法参考文献[20-21],具体为:土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾氧化-外加热法;全氮(TN)采用硫酸消化-凯氏定氮法;速效氮(AN)采用碱解扩散法;微生物量碳(MBC)和微生物量氮(MBN)采用氯仿熏蒸-K_2SO_4浸提法测定;浸提液中的可溶性有机碳(DOC)用 TOC-1020A 有机碳分析仪测定;可溶性有机氮(DON)采用可溶性全氮(TSN)与无机氮的差值得出,其中 TSN 采用碱性过硫酸钾氧化法测定,浸提液中无机氮采用流动分析仪测定。

表 1 样地基本概况

Table 1 Basic survey

样地号 Plot	类型 Type	所在地名 Place name	海拔/m Altitude	坡度/(°) Slope	林龄/a Stand age	平均胸径/cm Average DBH	郁闭度 Canopy density	林分密度 Stand density/(株/hm^2)
1	芒萁类	崇贤乡霞光村	187	25	21	7.8	0.6	2479
2	禾草类		185	22	21	7.0	0.7	2598
3	芒萁类	高兴镇老圩村	163	30	24	8.9	0.4	1898
4	禾草类		169	33	24	9.9	0.4	1299
5	芒萁类	高兴镇樟坑村	188	26	25	9.2	0.4	1900
6	禾草类		186	25	25	8.6	0.5	2345
7	芒萁类	鼎龙乡杨村	177	20	21	7.7	0.5	2197
8	禾草类		174	21	21	7.8	0.6	2497
9	芒萁类	江背镇华坪村	214	24	24	8.6	0.4	1874
10	禾草类		219	23	24	8.3	0.5	2273
11	芒萁类	江背镇郑塘村	210	28	24	8.0	0.5	2542
12	禾草类		216	31	24	9.6	0.5	1879
13	芒萁类	永丰乡船溪村	286	25	25	9.4	0.3	1325
14	禾草类		227	26	25	8.3	0.4	1800
15	芒萁类	龙口镇文院村	292	27	26	9.1	0.5	2310
16	禾草类		220	22	26	8.4	0.5	2073
17	芒萁类	龙口镇龙口村	205	30	26	8.8	0.4	1946
18	禾草类		218	27	26	9.7	0.4	1841

2.3 凋落物取样及指标测定

在样地的上、中、下方各选取具有代表性的 3 个 1 m×1 m 凋落物样方,按半分解层(大部分枯枝落叶已经粉碎,叶形不完整,分解成碎屑)和未分解层(枯枝落叶保持原状,叶形完整,外表没有分解的痕迹)对林下植被凋落物进行取样,将样品带回实验室在 80℃烘箱内烘干至质量恒定,用植物粉碎机将烘干后的凋落物磨碎,过 0.16 mm 筛,测定凋落物碳、氮含量。碳含量用重铬酸钾氧化-外加热法测定,氮含量用硫酸消化-凯氏定氮测定[20]。

2.4 数据处理及分析

在 SPSS 19.0 中,采用配对样本 t 检验,分析土壤碳、氮及凋落物各指标的差异;利用 Canoco 4.5 软件冗余分析(RDA)方法分析凋落物与土壤碳氮各指标间的相关关系。数据的处理及表格的制作在 Microsoft Excel 2010 中完成。

3 结果与分析

3.1 不同林下植被类型土壤碳氮特征

对不同土层两种林下植被类型的土壤碳、氮指标进行配对样本 t 检验,结果见图 2。由图 2 可知,0—10 cm 土层,土壤碳、氮各指标均表现为禾草类显著高于芒萁类($P<0.05$),禾草类有机碳、微生物量碳、可溶性有机碳、全氮、速效氮、微生物量氮、可溶性有机氮含量分别是芒萁类的 2.13、1.19、1.08、1.14、2.01、2.10、1.52 倍;

10—20 cm 土层,土壤碳、氮各指标也均表现为禾草类显著高于芒萁类($P<0.05$),但各指标含量(除可溶性有机碳、微生物量碳)高出的幅度都远小于 0—10 cm 土层相应指标高出的幅度;而在 20—40 cm 和 40—80 cm 土层,土壤碳、氮指标含量的高低在两种林下植被类型间均无明显的变化规律,且两种类型间的差异均不显著($P>0.05$)。

可以看出,两种林下植被类型土壤碳、氮各指标的差异主要体现在 0—10、10—20 cm 两土层,而 20—40、40—80 cm 两土层的差异不显著,这可能主要是由于芒萁类、禾草类两种林下植被类型的根系分布较浅,所以对较深土层的影响不显著。可以认为,0—10、10—20 cm 土层碳、氮指标的差异主要是由于林下植被的不同而非深根系的马尾松种群所导致。因此,后文针对 0—10、10—20 cm 两个土层两种类型的土壤碳、氮指标进行相关的分析。

3.2 不同林下植被类型凋落物质量

两种林下植被类型的凋落物养分含量见表 2。由表 2 可得,芒萁类的凋落物 C、N 含量及 C/N 值分别为 377.66—402.31 g/kg,9.14—10.21 g/kg,37.09—44.13;而禾草类的凋落物 C、N 含量及 C/N 值分别为 369.06—390.62 g/kg,10.29—11.33 g/kg,32.76—38.18。其中,两种林下植被类型不同分解层凋落物 C 含量及 C/N 值均表现为未分解层显著大于半分解层($P<0.05$),N 含量则为半分解层显著大于未分解层($P<0.05$);芒萁类的平均 C 含量、C/N 值均显著高于禾草类($P<0.05$),而禾草类的平均 N 含量显著高于芒萁类($P<0.05$)。

表 2 两种林下植被类型的凋落物 C、N 含量及 C/N 值

Table 2 C、N content and C/N ratio of litter under two understory vegetation types

类型 Type	半分解层 Semi-decomposed layer			未分解层 Undecomposed layer		
	C/(g/kg)	N/(g/kg)	C/N	C/(g/kg)	N/(g/kg)	C/N
芒萁类 *Dicranopteris* type	377.66±3.42Ba	10.21±0.12Ab	37.09±0.46Ba	402.31±2.88Aa	9.14±0.10Bb	44.13±0.52Aa
禾草类 Graminoid type	369.06±3.24Bb	11.33±0.19Aa	32.76±0.55Bb	390.62±2.61Ab	10.29±0.17Ba	38.18±0.360Ab

注:表中数据表示为平均值±标准误,不同大写字母代表相同指标不同分解层间差异显著($P<0.05$),不同小写字母代表相同指标不同植被类型间差异显著($P<0.05$)

3.3 土壤碳氮与凋落物质量的关系

两种林下植被类型的土壤碳氮与凋落物各指标冗余分析结果见图 3、图 4。由图 3 可知,在 0—10 cm 土层,芒萁类的第一标准轴(RD1)和第二标准轴(RD2)分别解释了土壤碳氮变量的 80.3%和 11.1%,其凋落物与土壤碳氮各指标的相关性由大到小为半分解层 C/N 值>未分解层 C 含量>半分解层 C 含量>未分解层 C/N 值;禾草类的第一标准轴(RD1)和第二标准轴(RD2)分别解释了土壤碳氮变量的 80.6%和 5.6%,相关性由大到小为半分解层 C/N 值>半分解层 C 含量>未分解层 C 含量>未分解层 C/N 值;两种类型的半分解层 C/N 值、C 含量及未分解层 C 含量均与土壤碳氮各指标呈极显著负相关($P<0.01$),未分解层 C/N 值与土壤碳氮各指标呈显著负相关($P<0.05$),其他指标与土壤碳氮的相关性不显著($P>0.05$)。

由图 4 可知,在 10—20 cm 土层,芒萁类的第一标准轴(RD1)和第二标准轴(RD2)分别解释了土壤碳氮变量的 36.0%和 30.8%,半分解层 C/N 值与土壤碳氮各指标存在显著相关性($P<0.05$),其他各指标与土壤碳氮的相关性均不显著($P>0.05$);而禾草类的第一标准轴(RD1)和第二标准轴(RD2)分别解释了土壤碳氮变量的 36.8%和 31.4%,半分解层 C 含量和未分解层 C 含量均与土壤碳氮各指标间存在极显著相关性($P<0.01$),其他各指标与土壤碳氮不存在显著相关性($P>0.05$)。

4 结论与讨论

4.1 不同林下植被类型凋落物质量特征

本研究表明,芒萁类的凋落物 C 含量、C/N 值均显著高于禾草类($P<0.05$),而禾草类的 N 含量显著高于芒萁类($P<0.05$),这可能主要是因为不同植被类型的生物学特性不同,从而使得其对元素的吸收强度和转移速率不同造成的;不同分解层凋落物 C 含量及 C/N 值均表现为未分解层大于半分解层,N 含量则相反,这与

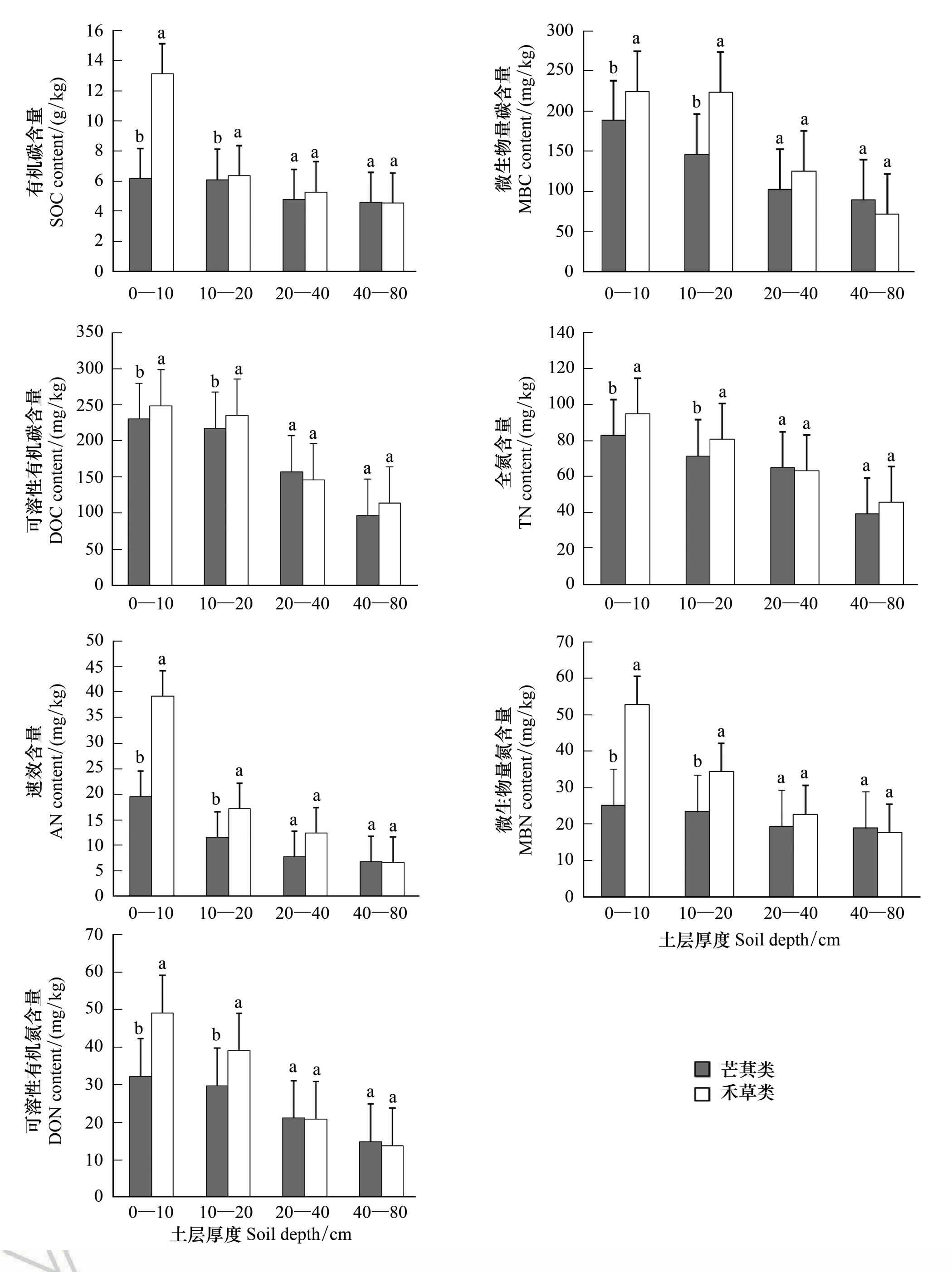


图 2　两种林下植被类型的土壤碳、氮指标分析

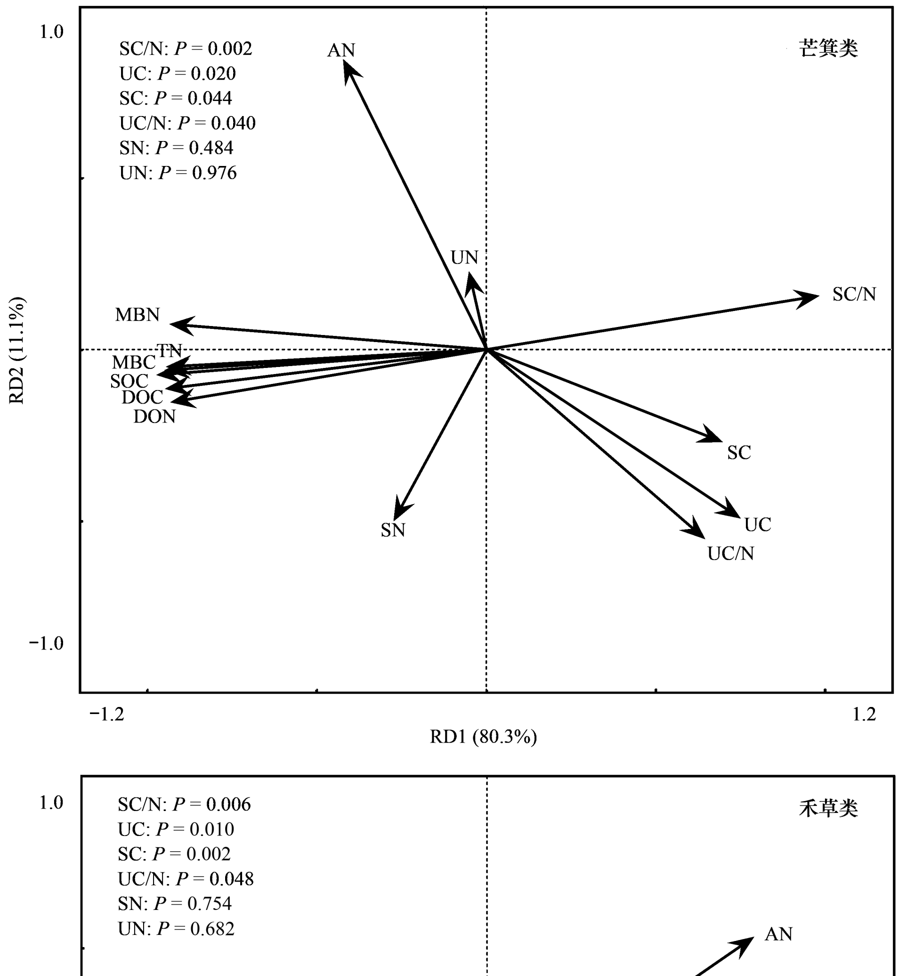
Fig.2　The analysis of soil carbon and nitrogen under two types of understory vegetation

不同小写字母表明相同土层不同植被间差异显著(P<0.05)

肖欣等[18]对马尾松人工林研究得出的凋落物 N 含量表现为半分解层大于未分解层,C 含量及 C/N 值则为未分解层大于半分解层相一致。主要原因可能是凋落物分解初期主要以碳水化合物、单宁、色素、脂肪等水溶性和有机溶性物质为主,使得碳含量减小,凋落物快速失重,其失重损失速率高于分解释放速率,从而导致凋落物氮含量相对上升[22-23]。

4.2　不同林下植被类型土壤碳氮特征

不同林下植被类型其凋落物分解输入土壤的有机质数量和质量不同[24],对细菌、真菌等微生物及土壤碳氮特征等都会产生不同的影响[25-26]。本研究得出,土壤碳氮各指标含量在 0—10、10—20 cm 土层均表现为禾



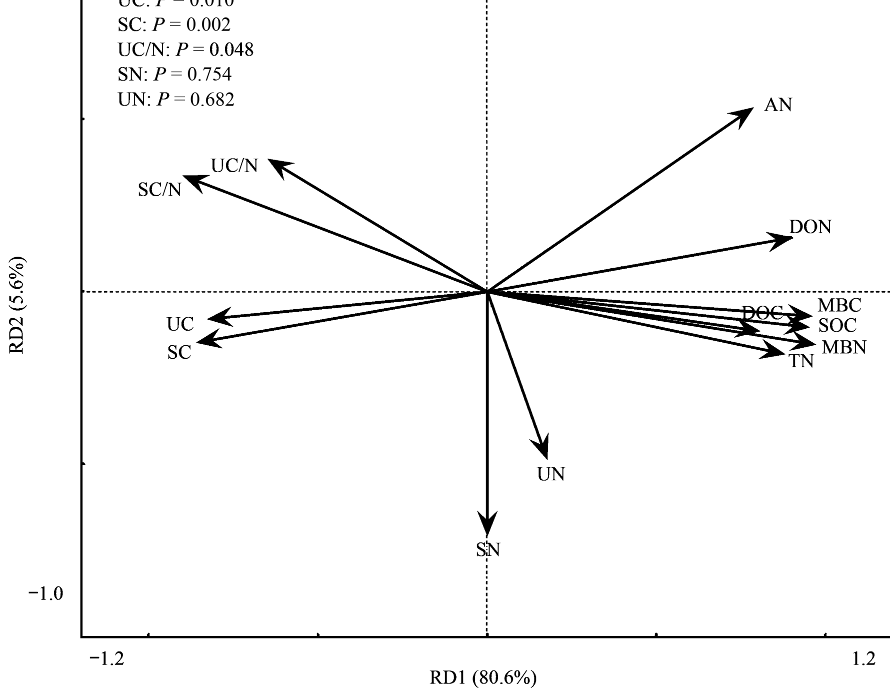
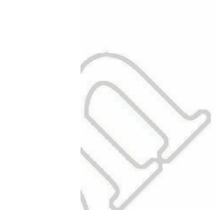


图 3　0—10 cm 土层各碳氮指标与凋落物因子冗余分析

Fig.3　Redundancy analysis of soil carbon and nitrogen and litter factors in the 0—10 cm soil depth

SC/N：半分解层碳氮比 carbon to nitrogen ratio of semi-decomposed layer；SC：半分解层碳含量 carbon content of semi-decomposed layer；SN：半分解层氮含量 nitrogen content of semi-decomposed layer；UC/N：未分解层碳氮比 carbon to nitrogen ratio of undecomposed layer；UC：未分解层碳含量 carbon content of undecomposed layer；UN：未分解层氮含量 nitrogen content of undecomposed layer



芒萁类

SC/N: P = 0.046
SC: P = 0.134
UC: P = 0.170
UC/N: P = 0.258
UN: P = 0.322
SN: P = 0.644

SOC, AN, UN, SN, DOC, TN, MBC, SC, DON, UC, SC/N, UC/N, MBN

RD2 (30.8%)　1.0　−1.0

RD1(36.0%)　−1.2　1.2

禾草类

SC/N: P = 0.152
SC: P = 0.030
UC: P = 0.022
UC/N: P = 0.136
UN: P = 0.084
SN: P = 0.276

UC, SC, DON, SC/N, UC/N, SN, DOC, UN, MBC, TN, MBN, AN, SOC

RD2 (31.4%)　1.0　−1.0

RD1 (36.8%)　−1.2　1.2

图 4　10—20 cm 土层各碳氮指标与凋落物因子冗余分析

Fig.4　Redundancy analysis of soil carbon and nitrogen and litter factors in the 10—20 cm soil depth

草类显著高于芒萁类,这与相关的研究结论相类似,如 Chen 等[27]研究发现禾本科植物沙生冰草的土壤氮循环速率及有效性均高于蒿属植物;陈海滨等[28]对南方稀土矿区自然恢复的芒萁以及人工种植的宽叶雀稗、枫

香和木荷 4 种植物进行研究表明,根际土壤全氮、有机碳含量均表现为宽叶雀稗高于芒萁,4 种植物土壤全氮含量只有宽叶雀稗和枫香差异性显著,而土壤全氮与土壤有机碳之间均呈显著正相关;赵芳等[17]研究得出,飞播马尾松林土壤有机碳含量在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层均表现为禾本类高于芒萁类,等等。禾草类土壤碳氮显著高于芒萁类的主要原因,一方面是由于禾草类凋落物 C/N 值显著低于芒萁类,而相关研究发现凋落物 C/N 值越低,土壤中的微生物活性增强,其分解归还土壤养分的速率加快,有利于提高土壤养分含量[29-30];另一方面可能是因为禾草类为须根系,且其与土壤中的固氮菌等微生物存在联合共生固氮作用[31],而芒萁类根系由根状茎和根组成,使得这两种植被类型的根际效应对土壤碳氮的影响产生差异。

4.3 不同林下植被土壤碳氮与凋落物质量的相关性

大量研究表明凋落物是森林生态系统内维持土壤养分的重要物质来源,其元素含量及分解速率的快慢会影响土壤养分含量,是土壤养分的重要归还库[6,32]。本研究得出,在 0—10 cm 土层,芒萁类和禾草类的半分解层 C/N 值、C 含量及未分解层 C 含量均与土壤碳氮各指标呈极显著负相关($P<0.01$),未分解层 C/N 值与土壤碳氮各指标呈显著负相关($P<0.05$),这与相关学者的研究结果类似,如卢同平等[33]对西双版纳的原始林、次生林和人工橡胶林的凋落物与土壤碳氮的研究表明凋落物 C 含量及 C/N 值均与土壤有机碳、全氮呈显著负相关;葛晓改等[34]研究发现不同林龄马尾松凋落物 C/N 值均与土壤有机质呈显著负相关。凋落物质量与土壤碳氮的相关性表明,凋落物 C/N 值及 C 含量越小,有利于提高土壤碳氮养分含量,究其原因可能是凋落物 C/N 值越低,N 释放越快,土壤中微生物活性增强,加速 N 的矿化速率,从而加快凋落物分解速率,使得土壤碳氮养分含量增加[29-30],如唐仕姗等[35]通过分析中国森林生态系统凋落物分解速率与其主要影响因素得出,凋落物分解速率随着 C/N 值的增大而较小,凋落物 C/N 值越高,其养分分解归还土壤的速率越慢,越不利于土壤养分的积累,同时,有研究表明凋落物 C 含量越高,则碳氮比越高,难分解的木质素、纤维素等化合物含量越高,从而导致凋落物分解速率降低[36]。此外,不少研究表明,凋落物质量对土壤养分的影响主要体现在表土层,随着土壤深度的增加其影响程度减小[37-38],本研究发现与 0—10 cm 土层相比,10—20 cm 土层两种林下植被类型凋落物质量与土壤碳氮显著相关的指标较少,这在一定程度上也表明凋落物质量对表土层养分的影响比对深土层的影响要大,这主要是因为凋落物分解后的养分最先进入表土层所导致。

4.4 结论

飞播马尾松林是在植被破坏程度大、水土流失严重的背景下通过飞播马尾松种子造林形成的一种森林类型。由于飞播前水土流失严重导致土壤中大量种子流失,其土壤种子库中禾草类物种占总物种数的 87%[39],所以易形成以禾草类植物为主的林下植被;而芒萁是南方水土流失区的先锋草本植物,在前期一旦其孢子侵入,能快速覆盖地表[28],致使土壤种子库中禾草类等其他植物难于恢复,形成以芒萁类为优势种的林下植被。这两种林下植被类型对土壤碳氮的影响是否存在差异,本研究得出土壤有机碳、微生物量碳、可溶性有机碳、全氮、速效氮、微生物量氮和可溶性有机氮含量在 0—10、10—20 cm 土层均表现为禾草类显著高于芒萁类($P<0.05$);芒萁类的凋落物 C 含量、C/N 值均显著高于禾草类($P<0.05$),而禾草类的 N 含量显著高于芒萁类($P<0.05$),综合分析表明禾草类植物在改善土壤质量方面优于芒萁类。因此,对芒萁类为林下植被优势种的飞播马尾松林,宜适当采取人工措施控制芒萁类的繁殖,以促进禾草类等其他植物的恢复,这将有利于提高飞播马尾松林的土壤质量。

参考文献(References):

[1] Merbold L, Eugster W, Stieger J, Zahniser M, Nelson D, Buchmann N. Greenhouse gas budget (CO_2, CH_4 and N_2O) of intensively managed grassland following restoration. Global Change Biology, 2014, 20(6): 1913-1928.

[2] Shrestha R K, Strahm B D, Sucre E B. Greenhouse gas emissions in response to nitrogen fertilization in managed forest ecosystems. New Forests, 2015, 46(2): 167-193.

[3] Roy A, Singh K P. Dynamics of microbial biomass and nitrogen supply during primary succession on blastfurnace slag dumps in dry tropics. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(3): 365-372.

[4] Deng B L, Li Z Z, Zhang L, Ma Y C, Li Z, Zhang W Y, Guo X M, Niu D K, Siemann E. Increases in soil CO_2 and N_2O emissions with warming

depend on plant species in restored alpine meadows of Wugong Mountain, China. Journal of Soils and Sediments, 2016, 16(3): 777-784.

[5] Szanser M, Ilieva-Makulec K, Kajak A, Górska E, Kusińska A, Kisiel M, Olejniczak I, Russel S, Sieminiak D, Wojewoda D. Impact of litter species diversity on decomposition processes and communities of soil organisms. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(1): 9-19.

[6] Maisto G, De Marco A, Meola A, Sessa L, De Santo A V. Nutrient dynamics in litter mixtures of four Mediterranean maquis species decomposing in situ. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(3): 520-530.

[7] Inoue T, Fukuzawa K, Watanabe T, Yoshida T, Shibata H. Spatial pattern of soil nitrogen availability and its relationship to stand structure in a coniferous-broadleaved mixed forest with a dense dwarf bamboo understory in northern Japan. Ecological Research, 2017, 32(2): 227-241.

[8] 涂玉, 尤业明, 孙建新. 油松-辽东栎混交林地表凋落物与氮添加对土壤微生物生物量碳、氮及其活性的影响. 应用生态学报, 2012, 23(9): 2325-2331.

[9] 夏秀雪, 高国强, 王东男, 肖立娟, 谷加存. 林下植被去除对水曲柳人工林土壤呼吸、微生物和根系动态的短期影响. 生态学杂志, 2017, 36(5): 1198-1207.

[10] Veres Z, Kotroczó Z, Fekete I, Tóth J A, Lajtha K, Townsend K, Tóthmérész B. Soil extracellular enzyme activities are sensitive indicators of detrital inputs and carbon availability. Applied Soil Ecology, 2015, 92: 18-23.

[11] 汪邦稳, 段剑, 王凌云, 杨洁. 红壤侵蚀区马尾松林下植被特征与土壤侵蚀的关系. 中国水土保持科学, 2014, 12(5): 9-16.

[12] 秦金舟, 何小定, 陈晓娟, 袁梦, 刘桂华. 2 种马尾松林林下植被生物量特性研究. 安徽农业大学学报, 2013, 40(5): 740-745.

[13] 黎芳, 潘萍, 宁金魁, 郭孝玉, 吴自荣, 欧阳勋志, 褚欣. 马尾松—木荷不同比例混交林林下植被物种组成及其多样性分析. 西北林学院学报, 2016, 31(6): 34-40.

[14] 赵芳, 欧阳勋志. 飞播马尾松林林下植被盖度与环境因子的关系. 应用生态学报, 2015, 26(4): 1071-1076.

[15] 丁松, 应学亮, 吕丹, 欧阳勋志. 赣南飞播马尾松林林下植被盖度对土壤质量的影响. 水土保持研究, 2014, 21(3): 31-36.

[16] 王轶浩, 王彦辉, 于澎涛, 熊伟, 李振华, 郝佳, 段健. 重庆酸雨区马尾松林凋落物特征及对干旱胁迫的响应. 生态学报, 2013, 33(6): 1842-1851.

[17] 赵芳, 欧阳勋志. 飞播马尾松林土壤有机碳空间分布及其影响因子. 生态学报, 2016, 36(9): 2637-2645.

[18] 肖欣, 王雄涛, 欧阳勋志. 马尾松人工林土壤有机碳特征及其与凋落物质量的关系. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2015, 39(6): 105-111.

[19] 葛晓改. 三峡库区马尾松林凋落物分解及对土壤碳库动态的影响研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012.

[20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.

[21] 汪文霞, 周建斌, 严德翼, 马勤安. 黄土区不同类型土壤微生物量碳、氮和可溶性有机碳、氮的含量及其关系. 水土保持学报, 2006, 20(6): 103-106, 132-132.

[22] 覃扬浍, 马姜明, 梅军林, 杨栋林, 庄枫红, 苏静. 漓江流域岩溶区檵木群落不同恢复阶段凋落物分解初期动态. 生态学报, 2017, 37(20): 6792-6799.

[23] 谌贤, 刘洋, 唐实玉, 杨帅, 陈亚梅, 杨林, 郑海峰, 李洪杰. 川西亚高山森林凋落物不同分解阶段基质质量特征. 西北植物学报, 2017, 37(3): 586-594.

[24] Sauheitl L, Glaser B, Dippold M, Leiber K, Weigelt A. Amino acid fingerprint of a grassland soil reflects changes in plant species richness. Plant and Soil, 2010, 334(1/2): 353-363.

[25] 王风芹, 田丽青, 桑玉强, 宋安东, 张劲松. 华北土石山区刺槐和栓皮栎人工林土壤微生物数量和微生物量碳、氮研究. 林业科学研究, 2016, 29(6): 956-961.

[26] 张超, 刘国彬, 薛萐, 王国梁. 黄土丘陵区不同植被类型根际微生物群落功能多样性研究. 草地学报, 2015, 23(4): 710-717.

[27] Chen J, Stark J M. Plant species effects and carbon and nitrogen cycling in a sagebrush-crested wheatgrass soil. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(1): 47-57.

[28] 陈海滨, 马秀丽, 陈志彪, 陈志强. 南方稀土矿区水土保持植物根际土壤碳氮及 pH 特征. 土壤学报, 2016, 53(5): 1334-1341.

[29] Sayer E J, Tanner E V J, Cheesman A W. Increased litterfall changes fine root distribution in a moist tropical forest. Plant and Soil, 2006, 281(1/2): 5-13.

[30] Moore T R, Trofymow J A, Prescott C E, Titus B D, Group C W. Nature and nurture in the dynamics of C, N and P during litter decomposition in Canadian forests. Plant and Soil, 2011, 339(1/2): 163-175.

[31] 张丽梅, 方萍, 朱日清. 禾本科植物联合固氮研究及其应用现状展望. 应用生态学报, 2004, 15(9): 1650-1654.

[32] 潘开文, 何静, 吴宁. 森林凋落物对林地微生境的影响. 应用生态学报, 2004, 15(1): 153-158.

[33] 卢同平, 张文翔, 牛洁, 林永静, 武梦娟. 西双版纳不同森林类型凋落叶与土壤碳氮变化研究. 热带作物学报, 2016, 37(8): 1526-1533.

[34] 葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 黄志霖, 付甜, 封晓辉. 不同林龄马尾松凋落物基质质量与土壤养分的关系. 生态学报, 2012, 32(3): 852-862.

[35] 唐仕姗, 杨万勤, 殷睿, 熊莉, 王海鹏, 王滨, 张艳, 彭艳君, 陈青松, 徐振锋. 中国森林生态系统凋落叶分解速率的分布特征及其控制因子. 植物生态学报, 2014, 38(6): 529-539.

[36] 陈法霖, 江波, 张凯, 郑华, 肖燚, 欧阳志云, 屠乃美. 退化红壤丘陵区森林凋落物初始化学组成与分解速率的关系. 应用生态学报, 2011, 22(3): 565-570.

[37] 高晟, 吴永波, 薛建辉, 姚健. 贵州省溶岩区植被类型对凋落物量、土壤有机碳及速效养分的影响. 水土保持通报, 2011, 31(5): 7-12.

[38] Zhou W J, Sha L Q, Schaefer D A, Zhang Y P, Song Q H, Tan Z H, Deng Y, Deng X B, Guan H L. Direct effects of litter decomposition on soil dissolved organic carbon and nitrogen in a tropical rainforest. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 81: 255-258.

[39] 陈颖颖, 潘萍, 吴自荣, 欧阳勋志. 飞播马尾松林土壤种子库组成特征及其自然恢复潜力. 江西农业大学学报, 2016, 38(1): 1-8.